

Erdős Géza

Mágneses tér mérések a helioszférában

Az MTA doktora cím megszerzéséért készített értekezés
tézisi

Budapest, MTA KFKI RMKI
2010

A kutatási téma előzményei és a kitűzött feladatok

A napszél felfedezése az űrkorszak kezdetén gyökeresen megváltoztatta a távolabbi környezetünkről alkotott ismereteinket. A napszél a Naptól radiálisan irányban szuperszonikus sebességgel kifelé áramló, elektromosan semleges, mágnesezett plazma. Ez a szuperszonikus sebességű áramlás a Nap-Föld távolság körülbelül százszorosáig létezik. A napszél által a csillagközi térbe kifújtt buborékot helioszférának nevezzük.

A napszél felfedezésével értelmet nyert az a korábban megmagyarázhatatlan jelenség, hogy a Napon megfigyelhető dinamikus folyamatokat (például fler kitöréseket) néhány napos késéssel földi zavarok követik (mágneses viharok, sarki fény). A Nap-Föld kapcsolatokban a közvetítő közeg a napszél. A napszél számos tulajdonsága megőrzi a Nap közelében, főleg a koronában uralkodó viszonyokat, amelyek a napszélbe „befagyva”, mint fossziliák utaznak a megfigyelőhöz. Egyik ilyen napszélbe „befagyott” fontos fizikai mennyiség a mágneses tér.

A helioszféra helyszíni, űrszondás megfigyelése korábban az ekliptika síkjára korlátozódott, a helioszférának csak egy kétdimenziós szeletében végeztek méréseket. Az 1990-ben fellőtt Ulysses szonda volt az első és eddig egyetlen űreszköz, amely 1992-ben a Jupiter gravitációs lendítésével elhagyta az ekliptikát és nagy inklinációjú (80°-os) Nap körüli poláris pályára állt. A kutatási téma célja az Ulysses szonda magnetométerével mért adatok tudományos elemzése volt, amellyel először vált lehetővé a helioszféra háromdimenziós szerkezetének feltárása. A szonda több, mint 18 éven keresztül szinte folyamatosan szolgáltatott adatokat, ezzel a 11 éves napfoltciklus szerinti változásokat is meg lehetett figyelni.

A napszéllel a helioszférába jutó mágneses tér az északi és déli féltekén ellentétes polaritású. A kétféle polaritást elválasztó áramlepel hullámos alakú, a hullámváz mértéke a napfoltciklussal változik. Az északi és déli polaritás napciklusonként felcserélődik. A kutatás egyik célja a helioszféra mágneses polaritásának vizsgálata volt a szélesség és hosszúság függvényében, különös tekintettel a napciklussal összefüggő időbeli változásokra. Először nyílt lehetőség a helioszféra globális mágneses terére vonatkozó modellek (napszél forrásterének modellje, Parker spirális erővonalak) ellenőrzésére nagy heliografikus szélességeken.

Az Ulysses magnetométerének legjobb időfelbontása 1 másodperc volt. A kutatás kiterjedt a rövididejű változásokra is. Az átlagos erővonalakra rakódó hullámok, szakadási felületek vizsgálatát elsősorban az napszél részecskéinél jóval nagyobb kinetikus energiájú, ún. energikus töltött részecskék mozgásának jobb megértése motiválta.

Vizsgálati módszerek

A kutatás alapját a mágneses térerősség vektorok nagy időfelbontású adatai szolgáltatták. Ezekhez készen jutottam hozzá, de saját munka volt az adatok megtisztítására írt interaktív program és annak használata a teljes mérési anyagra. Erre a tisztításra főleg a fluktuációk spektrumának számításánál volt szükség.

A mágneses tér idősorokat általában további számítási eljárásoknak vetettem alá, amelyek a jelenségek fizikai hátterének jobb megértését szolgálták. Tehát a mérési adatok elsődleges közlése helyett inkább az interpretálásra, modellekkel való összevetésre helyeztem a hangsúlyt. Ilyen eljárás volt a már említett fluktuáció spektrum számítás, valamint kiterjedten használtam a minimum variancia analízist is. Ez utóbbi síkhullámok esetén a hullámvektor irányának meghatározására szolgáló közelítő eljárás. A legbonyolultabb számítás a görbületi együtthatók meghatározása volt a spinor formalizmussal (lásd a disszertáció 6. fejezetét). Ez a számítás egyedülálló, tudomásom szerint korábban senki sem végzett hasonló.

Az űrszondákkal mért mágneses tér idősorokat általában a térerősség vektorok időbeli változásának alapján szokták vizsgálni. Ez természetes eljárás, azonban a fizikai interpretálás szempontjából már nem feltétlenül a legcélszerűbb. Ilyen eset a Nap forgásával visszatérő jelenségek vizsgálata. Ha az idősort 27 napos szakaszokra bontjuk és az egymást követőket összehasonlítjuk, felfedezhetjük a visszatérő eseményeket, de az eljárás nem precíz, mert az időben változó sebességű napszél okozta késésre korrekciót kellene végeznünk. Ezért a plazmába befagyott mágneses tér esetében a plazma forrásának heliografikus hosszúságát határoztam meg. Az összehasonlítást tehát nem a megfigyelés ideje szerint, hanem a forrás heliografikus hosszúsága szerint végeztem. Ehhez a számításhoz szükség volt a szondával mért napszél sebesség adatokra.

A plazmahullámok spektrumának meghatározását az energikus részecskék szóródásának vizsgálata motiválta. Ebben az esetben is nem a változások

időbeli sebessége az érdekes, hanem a fluktuációk hullámhossza, mert a mágneses tér körül giro-mozgást végző részecskék a hullámok térbeli mérete szerint lépnek rezonanciába. Hasonló a helyzet a szakadási felületek kiválasztásánál is, amelyeknél szintén a struktúrák térbeli mérete az érdekes. A mágneses tér idősorok átranzformálása térbeli változásra ebben az esetben különösen nagy eltérést okoz az időbeli változások alapján végzett vizsgálatokhoz eredményéhez képest.

Új tudományos eredmények

1. Mágneses szektorok sodródása a Nap egyenlítői forgásához képest

A Nap helioszférába kiterjedő mágneses tere az északi és déli féltekén egymással ellentétes polaritású, a két polaritást a helioszférában elválasztó felület (HCS) hullámos alakú és a Nappal közel együtt forog. A helioszférában tartózkodó megfigyelő a Nap forgása során váltakozva a felület felett és alatt helyezkedik el, az így megfigyelhető ellentétes mágneses polaritású heliografikus hosszúságszakaszokat mágneses szektoroknak nevezzük. Az Ulysses szonda 1992-től megkezdte a déli pólus felé tartó útját. Ebben az időben megfigyeltem, hogy a mágneses szektorok a Nap egyenlítői forgássebességével hosszú időn keresztül visszatértek, majd 1992. nyarától a szektorok a Naphoz rögzített koordináta-rendszerben kelet felé sodródtak [1]. Ez az egyenlítői forgásnál 2 nappal hosszabb forgási periódusnak felel meg. Ebben az időben az Ulysses egyre nagyobb heliografikus szélességre mozgott. Rámutattam, hogy a szektorok visszatérésének megnövekedett periódusa nem a fotoszféra szélességtől függő differenciális rotációja miatt történt, hanem egy koronaanyag kilökődés (CME) rendezte át a mágneses tér topológiáját a koronában. A szektorok kelet felé sodródása egybeesett visszatérő gyors napszéllyalábok (CIR) megjelenésével.

2. Mágneses szektorok eltűnése magasabb heliografikus szélességeken

Megfigyeltem, hogy a szonda 1993. májusában, a déli 30°-os heliografikus szélességnél elvesztette a mágneses szektorokat, és belépett az unipoláris, negatív mágneses térbe, amely a déli pólus koronalyukából származó gyors napszélre volt jellemző [2]. Megmutattam, hogy az eltűnő, pozitív szektor lassú napszélből származott, a szektor eltűnésével az Ulysses a lassú

napszelet is elvesztette. Összehasonlítást végeztem a fotoszférikus mérésből modellezett forrástérrel és megállapítottam, hogy a szektorok elvesztése fél évvel korábban történt, mint a forrástér alapján várható lenne. Ez a kétféle megfigyelés 10° -os heliografikus szélesség szerinti eltérését jelenti. A szektorok 1993-as elvesztésével analóg helyzet állt elő a következő napciklusban, szintén a napciklus leszálló ágában, 2005-ben. A két esetet összehasonlítva jelentős különbségek fedezhetők fel, köztük az, hogy a HCS hullámossága a 23-ik ciklusban nagyobb volt (40° -os), mint a 22-ik ciklusban (30° -os). A különbségek összefügghetnek a 23-ik ciklus különleges, elhúzódnó jellegével.

3. A Nap mágneses terének pólusváltása 2001-ben

A 23-ik ciklus maximumában, 2001-ben megfigyeltem a Nap pólusváltását [5]. Megállapítottam, hogy a pólusváltás a helioszférikus áramlepel (HCS) inklinációjának növekedésével és átfordulásával történt, nem pedig a pólusok közelében esetleg megjelenő ellentétes mágneses polaritású szigetek területének növekedésével, amelyeket nem tapasztaltam [12]. Meglepő megfigyelés volt, hogy a napfoltmaximum idején is a mágneses szektorok hosszú időn keresztül visszatértek. A pólusváltás ideje jelentősen eltért a forrástér modellekből meghatározott időhöz képest, amely egy évvel korábbra tette a póluscserét.

4. A helioszféra kétféle mágneses polaritását elválasztó áramlepel észak-déli aszimmetriája

Az Ulysses Naphoz közeli pályaszakaszát, amikor a déli pólustól az északiig terjedő utat gyorsan, egy év alatt teszi meg, gyors szélességi pásztázásnak hívjuk. Az első ilyen alkalommal az energikus részecskék fluxusában észak-déli aszimmetriát találtak. A megfigyelést a helioszférikus áramlepel (HCS) 10° -os déli irányú átlagos eltolódásával magyarázták. Az Ulysses szondával megfigyelt szektorátmenetek helyének elemzésével meghatároztam a HCS átlagos eltolódását az első és a harmadik szélességi pásztázások során [3,7,14]. Megállapítottam, hogy mindkét esetben az áramlepel néhány fokos szöggel déli irányban tolódott el. Az azonos irányban történő eltolódás azért meglepő, mert a két megfigyelés a Nap ellentétes mágneses polaritásánál történt. Az eltolódás kis mértéke összeegyeztethetetlen a részecskefluxus mérések magyarázatánál hivatkozott 10° -os eltolódással. A HCS eltolódásának kis mértékét a mágneses térerősség pólusoknál mért értékei is alátámasztják.

5. Mágneses erővonalak eltérése az elméleti Parker spiráltól

A mágneses erővonalak átlagos alakját a helioszférában Parker már 1963-ban elméletileg meghatározta. Az Ulysses szonda mágneses méréseivel nyílt először alkalom az elméleti modell ellenőrzésére nagy heliografikus szélességeken. A szonda első keringésekor a 60°-os déli szélesséig vizsgáltam a mágneses tér nagyléptékű geometriáját [4]. Megállapítottam, hogy a mágneses térerősség vektorok azimutális irányának legvalószínűbb értéke megegyezik a Parker modell jóslatával. Ugyanakkor az átlagos azimutális szög eltér a modelltől. A legnagyobb eltérést az unipoláris térben tapasztaltam 30°-60° déli heliografikus szélességen, ahol az eltérés 13°-os volt a spirális erővonalak lazább csavarodásának irányában. A megfigyelések szerint az azimutális szög szerinti eloszlásfüggvények aszimmetrikus alakúak, ez okozza az átlagos értékek eltérését a modelltől. Az eltérés legvalószínűbb okának a radiálisan kifelé terjedő nagy amplitúdójú Alfvén hullámok hatását javasoltam.

6. Energikus részecskék szórási szabad úthossza

Az Ulysses szonda teljes ekliptikán kívüli méréseire egy perces időfelbontású adatokból meghatároztam a mágneses tér fluktuációinak spektrumait [8,12]. Az energikus részecskék szórásának kvázi-lineáris elméletével a spektrumokból meghatároztam a részecskék szórási szabad úthosszát. Megállapítottam, hogy a szabad úthossz a Naptól mért távolsággal nő, 1,3 kitevőjű hatványfüggvény szerint. A távolságfüggésre korrekciót végezve megvizsgáltam a heliografikus szélességtől való függést, amely a gyors és lassú napszél határán lépcsőfüggvénnyel írható le, különben független a szélességtől. A szórási szabad úthossz a gyors napszélben rövidebb, mint a lassúban. Ez az eredmény felhasználható a kozmikus sugárzás naprendszerbeli modulációjának realizistikusabb modellezéséhez. A moduláció napciklustól való függéséhez ebben az esetben a pólusokból származó gyors napszél heliografikus szélesség szerinti kiterjedése is hozzájárul, amely a 11 éves napciklus szerint hullámzik.

7. Szakadási felületek normálisa és gyakorisága a napszélben

A napszélben gyakran lehet magnetohidrodinamikai szakadási felületekkel találkozni, amelyekben a plazma paraméterei rövid skálán változnak. Kritizáltam azt a gyakorlatot, amely a szakadási felületek kiválasztását a

mágneses térerősség vektorok időbeli változásának sebességén alapul, és helyette a struktúrák térbeli méretének alapján történő kiválasztást javasoltam [10]. Az Ulysses mágneses tér mérések legjobb időfelbontású adatain vizsgáltam a szakadási felületek gyakoriságát [10,12,13]. A szakadási felületek száma csökken a heliografikus távolsággal, ez a struktúráknak a turbulencia miatti elbomlásával magyarázható. Megmutattam, hogy a térbeli változásokon alapuló esemény szelekció szerint a gyors napszélben ritkábbak a szakadási felületek, mint a lassú napszélben, ez az eredmény ellentétes az általánosan használt időbeli változásokon alapuló módszer eredményével. Minimum variancia és keresztszorzat eljárásokkal meghatároztam a szakadási felületek normálisát [13]. Megállapítottam, hogy az események kiválasztásának hibás gyakorlata miatt a radiális normálisú szakadási felületek túlréprezentáltak, a valóságban a normálisok irányeloszlása összeegyeztethető az izotrópiával.

8. Mágneses erővonalak szeparációja a napszélben

Egymáshoz közeli mágneses erővonalak az erővonalak mentén eltávolodhatnak egymástól. Ez a probléma analóg a káosszal, amikor egy rendszer két közeli állapotának időfejlődését tanulmányozzák a fázistérben és a fázistérbeli trajektóriák eltávolodását vizsgálják. Egy elegáns matematikai apparátus, a spinor formalizmus alapján módszert dolgoztam ki az erővonalak eltávolodásának mágneses tér mérésekből történő meghatározására [6]. Ulysses adatokon megmutattam, hogy az eltávolodás az erővonalak ívhosszával exponenciálisan nő. Az eltávolodást azzal az ívhosszal jellemezhetjük, amely során a két erővonal közti távolság eszeresére nő. Az erővonalak szeparációja az energikus részecskéknek a mágneses térre merőleges szóródásához járulhat hozzá. Az Ulysses megfigyelések szerint a szeparációs távolság a Naptól mért távolsággal nő, de a növekedés kisebb mértékű, mint a kvázi-lineáris elméletből meghatározott szórási szabad úthossz [9,11]. Ez azt valószínűsíti, hogy a részecskéknek az erővonalakra merőleges diffúziója a külső helioszférában relatíve megnőhet. Ez a kérdés további elméleti vizsgálatokat igényel.

Az eredmények hasznosítása, továbbfejlesztése

Az Ulysses megfigyelések jelentősége abban rejlik, hogy olyan területeken végzehettünk méréseket, ahol eddig nem járt űrszonda. Ezzel lehetőség nyílt korábbi modellek ellenőrzésére, a modellek paramétereinek pontosítására. Ebből a szempontból különösen fontos az Ulysses mágneses tér mérések

összehasonlítása a fotoszférikus mérésekből modellezett napszél forrás terével. Az Ulysses megfigyelések szerint forrástér modellek elsősorban abban az irányban szorulnak javításra, hogy számot tudjanak adni a mágneses fluxus szélességtől való függetlenségéről a gyors napszélben. Az Ulysses szondához hasonló poláris Nap körüli pályán keringő szonda terve bizonytalan. Sokáig csak a Nap fotoszférájának földi mérésére kell hagyatkoznunk, ezért a földi mérés, mint egyetlen lehetőség felértékelődik. Fontos tehát a forrástér modellek fejlesztése, amely során az Ulysses megfigyeléseket a modellek kalibrálására használhatnánk.

A legutolsó, 23-ik napfoltciklus különleges, mintegy másfél évszázad óta nem volt ilyen elhúzódo ciklus. A 22-ik és 23-ik napfoltciklus Ulysses szondával megfigyelt adatainak összehasonlítása segíthet megérteni a napfoltciklusok különböző viselkedését és azok előrejelzését. Ez a kérdés gyakorlati jelentőséggel is bír (űridőjárási jelenségek, földi klímaváltozások).

A mágneses tér fluktuációinak vizsgálata a helioszférában nemcsak önmagáért érdekes, hanem más tudományterületek fejlődéséhez is hozzájárul (űr-plazmafizika, kozmikus sugárzás modulációja). Az Ulysses szonda hosszú időt töltött a sarkokra jellemző gyors napszélben, amely egyedülálló lehetőséget kínált a fluktuációk tanulmányozására, mert a megfigyeléseket nem zavarták az egyenlítőre jellemző tranziens jelenségek. Az Ulysses szonda mérési adatai még sok lehetőséget rejtjenek. Elméleti szempontból a spinor formalizmus továbbfejlesztése látszik ígéretesnek.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

1. Balogh A., G. Erdős, R.J. Forsyth, and E.J. Smith: The evolution of the interplanetary sector structure in 1992; *Geophys. Res. Lett.* **20**, 2331-2334 (1993)
2. Smith E.J., M. Neugebauer, A. Balogh, S.J. Bame, G. Erdős, R.J. Forsyth, B.E. Goldstein, J.L. Phillips, and B.T. Tsurutani: Disappearance of the heliospheric sector structure at Ulysses; *Geophys. Res. Lett.* **20**, 2327-2330 (1993)
3. Smith E.J., A. Balogh, M.E. Burton, G. Erdős and R. Forsyth: Results of the Ulysses fast latitude scan: Magnetic field observations; *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 3325-28 (1995)

4. Forsyth R.J., A. Balogh, E.J. Smith, G. Erdős, and D.J. McComas: The underlying Parker structure in the Ulysses magnetic field observations; *J. Geophys. Res.* **101**, 395-404 (1996)
5. Forsyth R.J., A. Balogh, T.S. Horbury, G. Erdős, E.J. Smith, M.E. Burton: The heliospheric magnetic field at solar minimum: Ulysses observations from pole to pole, *A&A*, **316** : 287-295 (1996)
6. Erdős G., A. Balogh, and J. Kóta: Separation rate of the magnetic field lines observed by Ulysses at high latitude: *Adv. Space. Res.* **19**, 843-846 (1997)
7. Erdős G. and A. Balogh: The symmetry of the Heliospheric Current Sheet as observed by Ulysses during the fast latitude scan; *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 245-248 (1998)
8. Erdős G, A. Balogh, J. Kóta: Scattering mean free path of energetic protons in the Heliosphere *Proceedings 26th International Cosmic Ray Conference*, Salt Lake City 1999, Vol **6**, pp 316-319 (1999)
9. Erdős G, A. Balogh, J. Kóta: Separation of magnetic field lines in the heliosphere, *Proceedings of the "Plasma Turbulence and Energetic Particles in Astrophysics" symposium*, Kraków 1999 (Eds: Ostrowski M, Schlickeiser R), pp 161-166 (1999)
10. Erdős G, A. Balogh, J. Kóta: Decay of magnetic field irregularities observed by Ulysses, *Space Sci. Rev.*, **97** : 221-224 (2001)
11. Erdős G: Wave, and turbulence in the solar wind *Turbulence, Waves, and Instabilities in the Solar Plasma. Proceedings of NATO Advanced Research Workshop*, Budapest, 2002 (NATO SCIENCE SERIES: II: Mathematics, Physics and Chemistry, 124) (Eds: Erdélyi R, Petrovay K, Roberts B, Aschwanden MJ), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003, pp 367-386 (2003)
12. Erdős G. and A. Balogh: In situ observations of magnetic field fluctuations, *Adv. Space Res.*, **35**, 625-635 (2005)
13. Erdős G. and A. Balogh: Density of discontinuities in the heliosphere, *Adv. Space Res.*, **41**, 287-296 (2008)
14. Erdős G. and A. Balogh: North-South asymmetry of the location of the heliospheric current sheet revisited, *J. Geophys. Res.*, in press (2010)